

Jozef URÍK¹, Stanislav MAREŠ², Miroslav KOBR³, Svatopluk ŘEZANINA⁴

**FOTOMETRICKÝ PRŮTOKOMĚR PRO MĚŘENÍ VELMI MALÝCH
VERTIKÁLNÍCH PRŮTOKŮ VODY VE VRTU
PHOTOMETRIC FLOWMETER FOR MEASURING SLOW VERTICAL WATER
FLOW IN WELLS**

Abstract

The logging tool is equipped with injector enabling to create in the streaming water a colour mark using the food dye Brilliant Blue (E133) as a tracer. A pair of photometric sensors is located in the axis of the flowmeter in a distance 5 and 10 cm above and below the special outlet nozzle of the injector. The switch in the upper part of the tool can activate the sensors of the desired distance (5 or 10 cm), what must be done before putting the tool into the well. The length of the tool is 150 cm, outer diameter 60 mm. The outlet nozzle is situated in a distance $L = 93$ cm from the bottom end of the tool. The measuring space with the outlet nozzle and photometric sensors is covered with a housing (metallic tube) of the outer diameter 50 mm. Four windows (60 x 30 mm) are created in the metallic tube with the angle distance 90° at the upper and lower end of the measuring space in order to adjust free water flow into the measuring space of the tool. The head of the tool is equipped for quick connecting to transportable logging system BLS-92H (Czech made product of the W+R Instrument Company) through one conductor armoured cable. The dye injector is operated from the cable winch, the amount of the injected dye tracer into the water flow is controlled by the operating time of the dye injector. The logging tool has a character of the flowmeter capable to measure vertical flow velocities in the range 10⁻⁴ to 10⁻² m/s or vertical flow rates in the range 10⁻⁶ to 10⁻⁴ m³/s. The start of the dye injection is synchronous with the starting point of the record representing the output signal from the upper (channel 1) as well as from the lower (channel 2) photometric sensor as a function of the time. The tracer mark recorded by the channel 1 proves the parameters of the water flow to the well head, by the channel 2 the parameters of the water flow to the bottom of the well. The flow velocity W is done by the ratio $\Delta h/\Delta t$, where Δh is the distance of the used photosensor from the injector nozzle and Δt is the recorded time of dye entry to the photosensor.

The proper function and reliability of the logging tool was checked in the model of the well under laboratory conditions. The model of the well was made from the PVC casing of the inner diameter 102 mm and length 2.0 m. The bottom of the PVC tube has been blind-folded and the tube equipped with a series of inlet and outlet valves in 5 levels with the mutual distance 0.5 m. Any inlet or outlet valve can be connected with water inflow or water outflow. In this way, it was possible to simulate different patterns of water flow in the well. We have checked the reliability of the injector, the optimum dye tracer concentration, the proper function of photosensors in both the distances from the injector nozzle ($\Delta h = 5$ cm; $\Delta h = 10$ cm), their reaction after injecting the dye tracer

¹ Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Albertov 6, 128 43 Praha 2, Aquatest a.s., divize karotáž, Geologická 4, 152 00 Praha 5

² Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Albertov 6, 128 43 Praha 2

³ Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Albertov 6, 128 43 Praha 2

⁴ W+R Instruments, s.r.o., Ječná 29a, 621 00 Brno

in the case of water flow to the top of the tube as well as to the bottom of the tube. We have compared the flow velocity determined by the flowmeter with the volumetric flow rate using the calibrated glass cylinder and the stop-watch. The results of the laboratory tests can be summarised in the following way:

- the optimum dye tracer (Brilliant Blue, FCF) concentration for the injector is $C = 250 \text{ mg/l}$,
- the dye injector has to operate 5 to 10 s in order to create tracer mark that can be easily recognized by the photosensor and evident in the output record,
- the recording channels 1 and 2 are good separated, there is no mutual influence, in the case of the water flow to the top, the tracer mark is recorded by the channel 1, in the case of the water flow to bottom, the tracer mark is recorded by the channel 2,
- the total recording time of the photosensor output signal is usually 60 s.
- the tool can be equipped with the outside rubber ring mounted on the tool housing in the place corresponding to the position of the injector nozzle; the goal is the sensitivity increase.

Key words: hydrologging, fractured rock environment, photometric flowmeter.

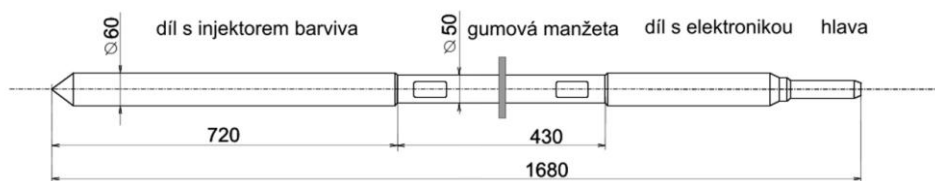
Úvod

Karotážní průtokoměry mají své oprávněné místo mezi karotážními přístroji používanými pro stanovení parametrů proudící kapaliny v průzkumném vrtu, nebo monitorovacích vrtech sloužících ke kontrole hydraulických parametrů kolektoru (Morin et al., 1988). Běžně používané vrtulkové průtokoměry mají práh citlivosti pro měření vertikální rychlosti $W_{lim} = 10\text{--}2 \text{ m/s}$, speciální průtokoměry jako je pulsní tepelný průtokoměr (Hess, 1986, 1990) nebo elektromagnetický průtokoměr (Molz et al., 1989) dosahují citlivosti řádu 10^{-3} m/s . V souvislosti se vzrůstajícím zájmem o průzkum puklinových horninových systémů (Vernon et al., 1993; Wilson et al., 2001) a jejich hydraulických vlastností (Hess et Paillet, 1990) se objevují nové metodické přístupy k jejich výzkumu, vyžadující opakované měření změn vertikální rychlosti v pozorovacích vrtech během krátkodobého hydraulického testu ve vybraném vrtu testované lokality. Ve snaze mít představu o charakteru puklinového prostředí ve větším plošném rozsahu, tedy při vzdálenosti průzkumných vrtů několik desítek až prvé stovky metrů, objevují se požadavky na velmi citlivé průtokoměry schopné měřit vertikální rychlosti řádu $10\text{--}4 \text{ m/s}$ a objemové průtoky řádu $10\text{--}6 \text{ m}^3/\text{s}$. Níže popsanou konstrukcí fotometrického průtokoměru se snažíme tomuto požadavku vyhovět.

Konstrukce a funkce karotážní sondy

Karotážní sonda je vybavena injektorem, umožňujícím vytvořit v proudící kapalině barevnou značku potravinářským barvivem Brilliant Blue FCF (E133). Kolem místa vstřiku jsou v ose sondy symetricky umístěny dvojice fotometrických čidel ve vzdálenosti 5 a 10 cm od místa vstřiku. Přepínač uložený v horní části sondy umožňuje, aby byla v činnosti buďto dvojice detektorů se vzdáleností 5 cm nebo 10 cm od vstřikovací trysky. Volbu vzdálenosti čidel je nutno uskutečnit před vložením sondy do vrtu. Délka sondy je 168 cm, průměr 60 mm (Obr. 1). Tryska je situována 93 cm od dolního konce sondy, prostor trysky a fotometrických čidel je zakryt pláštěm o průměru 50 mm, 4 podélné otvory o délce 60 mm s úhlovým rozestupem 90° situovaných symetricky kolem místa vstřiku nad a pod dvojicí fotometrických čidel zaručují volný pohyb vody účinným prostorem sondy. Sonda je ukončena hlavou pro snadné připojení na jednožilný pancéřovaný kabel lehké přenosné karotážní soupravy BLS-92H (výrobek firmy W+R Instruments), kterou je vybaveno řešitelské pracoviště. Injektor barviva je

ovládán dálkově zapnutím elektromotoru, který posunuje pístem velké injekční stříkačky (objem 55 cm³), množství barviva vytlačeného pístem do účinného prostoru sondy je dáno dobou, po kterou je motor injektoru v činnosti. Karotážní sonda má charakter fotometrického průtokoměru, schopného registrovat vertikální pohyby vody řádu 10–3 až 10–4 m/s a objemové vertikální průtoky řádu 10–6 m³/s. Při zapnutí motoru injektoru je současně spuštěna časová registrace výstupního signálu z prvního fotometrického čidla (situovaného nad místem vstříku) a z druhého (situovaného pod místem vstříku). Barevná značka zaznamenaná prvním čidlem svědčí o pohybu vody směrem k ústí vrtu, zaznamenaná druhým čidlem svědčí o pohybu vody směrem k čelbě vrtu. Rychlost proudící vody W je dána poměrem $\Delta h/\Delta t$, kde Δh je vzdálenost použitého fotometrického čidla od místa vstříku barviva, Δt je čas, ve kterém byl zaregistrován průchod barevné značky fotometrickým čidlem.



Obr. 1 Konstrukční schéma fotometrického průtokoměru

Laboratorní testování přístroje

Ověření funkční spolehlivosti sondy bylo provedeno v laboratorních podmínkách v modelu vrtu. Model vrtu představuje PVC trubka délky 2 m o vnitřním průměru 102 mm. Trubka je opatřena dnem a sadou vstupních a výstupních ventilů v pěti úrovních se vzájemnou vzdáleností 0,5 m. Přívod a odtok užitkové vody je možno napojit na kterýkoliv vstupní nebo výstupní ventil a tím simulovat různé režimy pohybu vody ve vrtu. Zaměřili jsme se především na základní funkce přístroje při využití obou vzdáleností ($\Delta h = 5$ cm, $\Delta h = 10$ cm) fotometrických čidel od místa vpravení barviva do proudící vody, na vhodnou koncentraci barviva, činnost injektoru, schopnost spolehlivě stanovit směr pohybu a posoudit rychlost vzájemným porovnáním údajů o objemovém průtoku měřeném odměrnou nádobou a hodnotě rychlosti $W = \Delta h/\Delta t$ stanovené z údajů fotometrické sondy výše popsáním způsobem.

Výsledky laboratorních testů

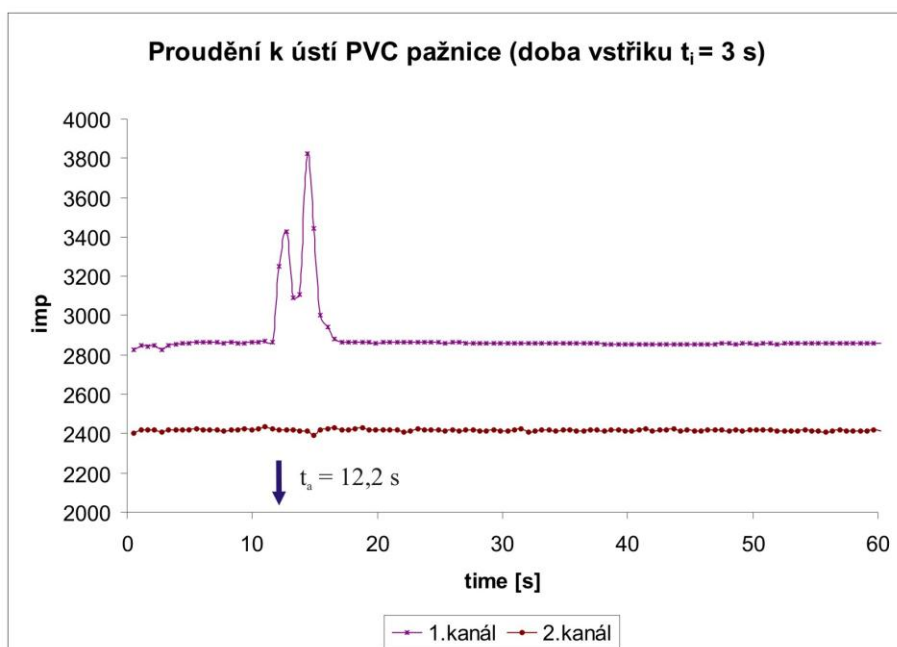
Výsledky provedených prací v laboratorních podmínkách lze shrnout takto:

- ☐ nejvhodnější koncentrací barviva Brilliant Blue (E133) je hodnota $C = 200$ až 300 mg/l,
- ☐ motor injektoru stačí ponechat v činnosti 3 až 5 s aby se vytvořila dobře registrovatelná barevná značka fotometrickým čidlem (Obr. 2, Obr. 3, Obr. 4),
- ☐ objem barviva 55 ml (využitelný objem injekční stříkačky) stačí na vytvoření 60 značek při době vstříku 3 s, nebo 35 značek při době vstříku 5 s,
- ☐ mezi registračním kanálem 1 a 2 se neobjevují žádné přeslechy, při pohybu vody směrem k ústí vrtu je registrován průchod barevné značky pouze horním fotometrickým detektorem (kanál 1), při pohybu vody

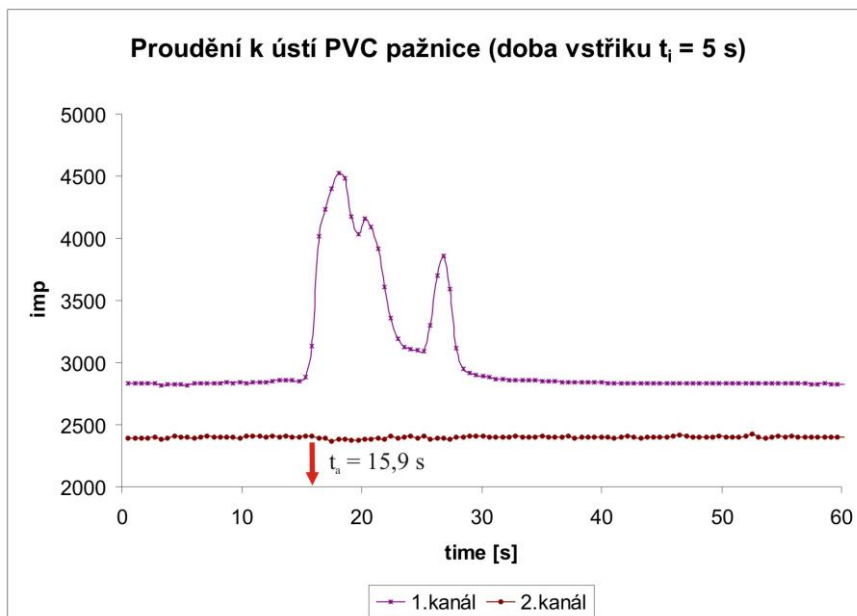
směrem k čelbě vrtu pouze dolním fotometrickým detektorem (kanál 2); pro snadné rozlišení mají oba registrační kanály rozdílnou základní úroveň měřeného signálu i intenzitu barevné stopy. Časová délka záznamu fotometrických čidel nepřekročí obvykle dobu 60 s (viz Obr. 2, Obr. 3, Obr. 4).

Pro zvýšení citlivosti je sonda vybavena výměnnou pryžovou manžetou odpovídající průměru vrtu. Tím je dosaženo toho, že voda proudící podél osy vrtu musí z největší části protékat účinným prostorem průtokoměru.

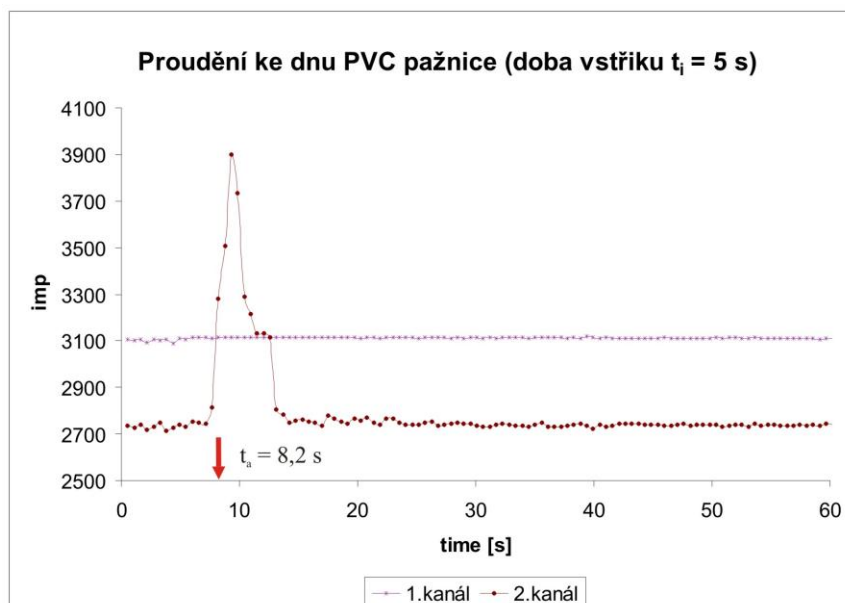
Vzájemný empirický vztah mezi vertikálním průtokem Q_p (10^{-6} m³/s) testovací pažnice a vertikální rychlostí vody W_s (10^{-3} m/s) proudící účinným prostorem průtokoměru je uveden pro fotometrická čidla vzdálená od místa vstřiku 5 cm na Obr. 5 a pro fotometrická čidla vzdálená od místa vstřiku 10 cm na Obr. 6.



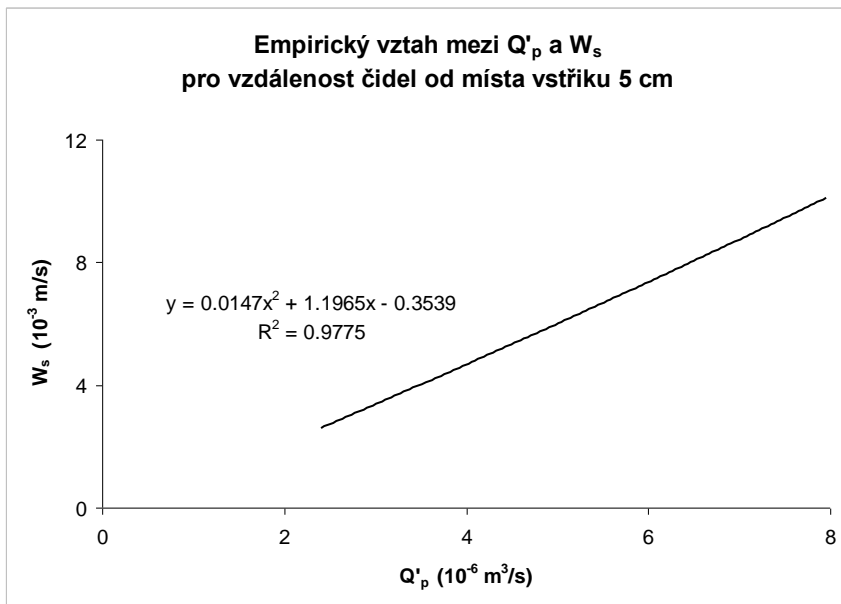
Obr. 2 Časový záznam průchodu barevné značky fotometrickým čidlem při kapalině proudící k ústí PVC pažnice (1. kanál). Doba vstřiku barviva $t_i = 3$ s. Čas příchodu je na časové ose vyznačen šipkou ($t_a = 12,2$ s).



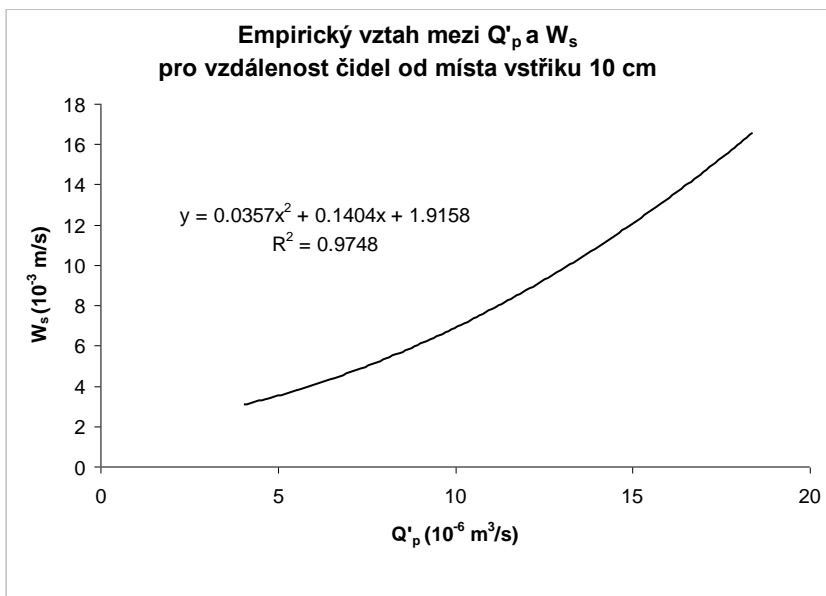
Obr. 3 Časový záznam průchodu barevné značky fotometrickým čidlem při kapalině proudící k ústí PVC pažnice (1. kanál). Doba vstřiku barviva $t = 5$ s. Čas příchodu je na časové ose vyznačen šipkou ($t = 15,9$ s).



Obr. 4 Časový záznam průchodu barevné značky fotometrickým čidlem při kapalině proudící ke dnu PVC pažnice (2. kanál). Doba vstřiku barviva $t = 5$ s. Čas příchodu je na časové ose vyznačen šipkou ($t = 8,2$ s).



Obr. 5 Empirický vztah mezi vertikálním průtokem Q'_p (10^{-6} m³/s) vody modelem vrtu a vertikální rychlostí vody W_s (10^{-3} m/s) proudící účinným prostorem průtokoměru pro fotometrická čidla vzdálená od místa vstříku 5 cm.



Obr. 6 Empirický vztah mezi vertikálním průtokem Q'_p (10^{-6} m³/s) vody modelem vrtu a vertikální rychlostí vody W_s (10^{-3} m/s) proudící účinným prostorem průtokoměru pro fotometrická čidla vzdálená od místa vstříku 10 cm (pohyb vody ke dnu PVC pažnice).

Závěr

Laboratorní testy prokázaly, že fotometrický průtokoměr splňuje základní požadavky na průtokoměry, které se v zahraničí používají pro sledování malých změn v objemovém vertikálním průtoku v pozorovacích vrtech jako odezva na krátkodobý čerpací nebo injekční test v jednom z blízkých vrtů testované lokality. Analýza časových změn vertikálního objemového průtoku umožňuje při porovnání s modelovými křivkami posoudit rozdílné typy puklinového propojení v prostoru mezi testovanými vrty a stanovit průtočnost a zásobnost puklinového systému (Williams and Paillet, 2002).

Prohlášení: Uvedené výzkumné práce byly provedeny převážně v rámci projektu 205/07/0777 finančně podpořeného GAČR a částečně v rámci výzkumného záměru MSM 0021620855 finančně podpořeného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR.

Literatura

- [1] Hess, A. E. (1990): Thermal-pulse flowmeter for measuring slow water velocities in boreholes. – Open Report 87-121, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.
- [2] Hess, A. E. (1986): Identifying hydraulically conductive fractures with a slow velocity borehole flowmeter. – Canadian Geotechnical Journal, V. 23, No. 1, pp. 69-78.
- [3] Hess, A. E. and Paillet, F. L. (1990): Applications of thermal-pulse flowmeter in the hydraulic characterization of fractured rocks. In: Geophysical Applications for Geotechnical Investigations, ASTM STP 1101, pp. 99-112.
- [4] Molz, F. J., Morin, R. H., Hess, A. E., Melville, J. G. and Güven, O. (1989): The impeller meter for measuring aquifer permeability variations: evaluation and comparison with other tests. Water Resources Res., 25, 1677-1683.
- [5] Morin, R. H., Hess, A. E. and Paillet, F. L. (1988): Determining the distribution of hydraulic conductivity in fractured limestone aquifer by simultaneous injection and geophysical logging. Ground Water, Vol. 26., No. 5, p. 587.
- [6] Vernon, J. H. et al. (1993): Application of borehole geophysics in defining the wellhead protection area for fractured crystalline bedrock aquifer. The Log Analyst, January – February, p. 41-47.
- [7] Williams, J. H. and Paillet, F. L. (2002): Using flowmeter pulse tests to define hydraulic connections in the subsurface: A fractured shale example. – Journal of Hydrology, 265, 100-117.
- [8] Wilson, J. T., Mandell, W. A., Paillet, F. L., Bayless, E. R., Hanson, R. T., Kearl, P. M., Keerfoot, W. B., Newhouse, W. M and Pedler, W. H. (2001): An evaluation of borehole flowmeters used to measure horizontal groundwater flow in limestone of Indiana, Kentucky, and Tennessee, 1999. – U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 01-4139.

